

Розроблення методу оцінки працездатності обладнання для транспортування стиснутого природного газу

А. П. Джус, А. В. Андрусяк, Я. С. Гриджук, Т. Л. Романишин

З метою безпечного транспортування стиснутого природного газу за результатами проведених досліджень запропоновано алгоритм методу оцінки працездатності ємностей комбінованого типу. Метод передбачає визначення параметрів стану газу в процесі заповнення ємності з врахуванням процесів теплообміну та оцінку напружено-деформованого стану ємності з врахуванням умов експлуатації і результатів технічного огляду. Для реалізації методу використано засоби для виявлення та визначення форми і розмірів ймовірних корозійних пошкоджень поверхні металевого лайнера під композитною оболонкою. Оцінку напружено-деформованого стану ємностей з врахуванням умов експлуатації запропоновано здійснювати шляхом розроблення та аналізу відповідних моделей. Можливість отримання достовірних результатів за наявності доступних механізмів підтверджено власними дослідженнями особливостей протікання технологічних процесів завантаження та розвантаження. Для перевірки правильності побудови імітаційної моделі на етапі дослідження напружено-деформованого стану ємності з врахуванням фактичних умов експлуатації, розроблено математичну модель, яка враховує умови взаємодії елементів конструкції, дію внутрішнього тиску газу та температури. Використання моделі скорочує затрати на експериментальні дослідження та сприяє забезпеченню достовірності результатів імітаційного моделювання. Перевагою методу є визначення розрахункового тиску руйнування ємностей комбінованого типу за наявного стану небезпечних зон та впливу умов експлуатації. Практичне значення одержаних результатів визначається можливістю використання з метою забезпечення працездатності на етапі проектування та в процесі експлуатації ємностей

Ключові слова: ємності комбінованого типу, умови експлуатації, корозійне пошкодження, імітаційне моделювання, працездатність

1. Вступ

При видобуванні газу на шельфі актуальним є питання створення системи його транспортування до берега, що може здійснюватися трубопровідним транспортом або спеціальними суднами в зрідженому (LNG) чи стиснутому (CNG) стані. З врахуванням невеликої вартості берегової інфраструктури, можливості зміни маршрутів та відносно невисоких транспортних тарифів доцільним є використання технології CNG. Результатами техніко-економічного аналізу вказують на ефективність транспортування з шельфових родовищ до 1 млрд. куб. м газу на рік у стиснутому стані самохідними або несамохідними

баржами [1, 2]. Для реалізації технології необхідною умовою є наявність ємностей для транспортування газу. При цьому вони повинні характеризуватися невисокими масо-габаритними показниками та бути працездатними впродовж визначеного терміну експлуатації. Зважаючи на доволі широкий діапазон навантажень, дослідження, спрямовані на максимальне врахування умов експлуатації та технічного стану з метою забезпечення високої достовірності оцінки працездатності обладнання, є актуальними.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

За результатами аналізу пропонованих провідними компаніями галузі технічних рішень встановлено, що для формування вантажних систем морських транспортних засобів, і зокрема барж, можливим є використання спеціальних модулів з композитними ємностями типу CNG-4 [3]. Основною перевагою таких ємностей в більшості випадків є порівняно низька маса. Лейнер композитної ємності є формують формуючим, а основне навантаження сприймає обмотка, просочена зв'язуючим матеріалом. Використання пластикового лейнера у поєднанні з вуглецевим волокном дозволяє максимально зменшити масу ємності, що за умови забезпечення необхідної міцності є відчутною конкурентною перевагою. Також до переваг композитних ємностей необхідно віднести високий рівень безпеки. Так, при дії внутрішнього тиску руйнування балонів відбувається без утворення уламків. Єдиним суттєвим недоліком будь-якої композитної ємності є її низька стійкість до ударних навантажень. Незважаючи на високу вартість виробництва, наявні технічні характеристики визначають основні сфери застосування композитних ємностей. Зокрема це такі, що передбачають часте переміщення ємностей зі стиснутим газом.

Альтернативою композитним може бути використання ємностей комбінованого типу (CNG-2) як у модульному виконанні [1], так і у вигляді довгомірної труби [4]. Щодо суцільнометалевих циліндричних посудин високого тиску, і зокрема балонів типу CNG-1, то загальним недоліком є велика маса, зумовлена значною товщиною стінки, та, як наслідок, неефективне використання міцнісних властивостей матеріалу.

З міркувань зниження вимог щодо підготовки газу оптимальним є варіант вертикального розташування ємностей, що створює можливість видалення, за необхідності, сконденсованої із природного газу рідини. Однак при монтажі таких ємностей на баржах свої корективи вносять обмеження щодо допустимої висоти.

Стосовно вимог до ємностей, а саме балонів різних типів, то вони регламентуються нормативними документами, зокрема ISO 11439-2003 [5]. Основним при проектуванні та виготовленні є встановлення відповідності конструкції необхідними розрахунками і підтвердження результатами випробування.

Конструкції всіх типів балонів при можливому руйнуванні балона внаслідок дії тиску під час нормальної експлуатації повинні забезпечувати вид ушкодження "витік до руйнування". Витік у металевому балоні типу CNG-1 та металевих лейнерах балонів типу CNG-2 і CNG-3 повинен відбуватися тільки у випадку

розвитку втомної тріщини. Також необхідним є визначення максимального допустимого розміру дефекту в будь-якому місці металевого балона, що відповідає вимогам циклічного випробування тиском і “витоку до руйнування”.

Відповідно до вже згадуваного стандарту ISO 11439-2003, а також ECE R-110, вимоги до випробування композитних балонів є значно вищими, ніж до сталевих. Стандарти вимагають проведення для балонів типу CNG-4 у порівнянні зі сталевими тринадцяти додаткових тестів. Серед них – циклічне випробування тиском при екстремальних температурах, а саме мінус 40 і плюс 65°C. Також необхідно зазначити, що окремі випробування проводяться при вологості повітря 95 %. Випробування балонів типу CNG-4, що відповідають 30-ти літньому життєвому циклу, засвідчують можливість експлуатації впродовж 20 років без повторного тестування.

Задля визначення можливого ресурсу експлуатації балонів типу CNG-2 свого часу проводились різноманітні дослідження. Для балонів зі сталеву оболонкою зварної конструкції відомі випробування в режимі циклічного навантажування внутрішнім гідравлічним тиском, що змінювався в діапазоні від 2,0 до 22,0 МПа з частотою не більше 10 циклів за хвилину [6]. Аналогічні випробування проведені авторами [7] для балонів з суцільнотягнутою сталеву оболонкою. Після випробування на втому шляхом створення 20000 циклів тиском від 0 до 20,7 МПа, дослідні зразки були доведені до руйнування постійним збільшенням тиску від 0 до 61,5 МПа.

Аналізуючи особливості випробувань балонів, необхідно зазначити, що вони не враховують важливих експлуатаційних чинників, а саме: зміни температури газу і, відповідно, стінок балонів з одночасним підвищенням або зниженням тиску, зміни властивостей матеріалів та впливу корозійних процесів.

Останні є можливими через наявність в композитному підсиленні кільцевих тріщин. Вони утворюються внаслідок коливань температури навіть за умов відсутності навантажень внутрішнім тиском. Такі тріщини не впливають на міцність композиту, але дозволяють проникнути волозі до сталеву оболонки. Внаслідок цього незахищена поверхня оболонки зазнає корозійного пошкодження. Свідченням цього є наявність продуктів корозії як на зовнішній, так і на внутрішній поверхні композитного підсилення (рис. 1).



Рис. 1. Наявність продуктів корозії металеву лейнера: *а* – на зовнішній поверхні композитного підсилення; *б* – на внутрішній поверхні композитного підсилення

Таким чином, металокомпозитні балони великої місткості (CNG-2 і CNG-3), є об'єктами підвищеної небезпеки, руйнування яких в процесі експлуатації може призвести до тяжких наслідків, великої матеріальної шкоди. Тому для них згідно [5] термін служби повинен визначатися з врахуванням особливостей розвитку втомних тріщин при циклічних випробуваннях. Ультразвуковий або еквівалентний йому неруйнівний контроль кожного балона і лейнера повинен забезпечувати відсутність дефектів, які перевищують максимально допустимий розмір.

Вибір методів контролю є одним з основних завдань при оцінці технічного стану металокомпозитних балонів з метою попередження аварійних руйнувань. При цьому необхідною є наявність засобів для оцінки стану поверхні металевих лейнерів комбінованих посудин високого тиску, доступ до яких обмежений через наявність зовнішнього зміцнювального шару композитного матеріалу.

На сьогодні відомі особливості розроблення на базі високочастотного індуктивного давача засобів, що реалізують можливість ідентифікації дефектів за розмірами і за формою з високою точністю вимірювання та його відтворення у тривимірному вигляді [8]. Результати досліджень з допомогою автоматизованої системи контролю з наступним відтворенням ділянок втрат металу на базі просторових даних про товщину стінки труби наведені в [9]. Необхідна для цього інформація отримана від динамічної системи переміщення, створеної на базі високочастотного індуктивного давача як сенсора втрат металу в кожній точці контролю. Авторами [10] за результатами теоретичних та експериментальних досліджень запропоновано використовувати зазначену систему для неруйнівного контролю металевих лейнерів конструкцій комбінованого типу.

Щодо врахування експлуатаційних чинників, то наявними є результати досліджень впливу технологічних процесів завантаження [11] та розвантаження [12] морських транспортних засобів на рівень температурних навантажень і формування напружено-деформованого стану елементів вантажних систем. Однак, не обґрунтовані механізми оцінки працездатності обладнання за наявних умов експлуатації та технічного стану ємностей комбінованого типу, і зокрема тих, що експлуатуються в складі морських транспортних засобів.

3. Мета і задачі досліджень

Метою роботи є розроблення методу оцінки працездатності обладнання для транспортування стиснутого природного газу з врахуванням технічного стану та особливостей умов його експлуатації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- обґрунтувати основні принципи реалізації методу оцінки працездатності обладнання;
- запропонувати шляхи перевірки достовірності результатів досліджень напружено-деформованого стану ємності.

4. Обґрунтування основних принципів реалізації методу оцінки працездатності обладнання

За ймовірності корозійного пошкодження металевого лейнера ємності комбінованого типу, контроль стану його поверхні є одним з головних завдань з метою забезпечення працездатності. Оцінити фактичний стан ємності та встановити терміни подальшого діагностичного контролю є можливим за результатами електрометричних обстежень. Відповідно до вимог нормативних документів допустимий розмір дефекту встановлюється за результатами випробувань балонів, що містять штучні дефекти певних розмірів. Однак в процесі експлуатації ємностей комбінованого типу металевий лейнер зазнає не механічного, а корозійного пошкодження. Це зумовлює необхідність виявлення складних корозійних дефектів та приведення до більш простих. При цьому, як уже зазначалось, першочерговим завданням є наявність засобів для оцінки стану поверхні металевих лейнерів комбінованих посудин високого тиску, доступ до яких є обмеженим через наявність зовнішнього зміцнювального шару композитного матеріалу.

Водночас, відповідно до чинних нормативних документів, розрахунковий тиск руйнування лейнера балонів типу CNG-2 повинен бути не меншим $1,3P$ (P – робочий тиск). При цьому тиск руйнування, визначений за результатами гідравлічних випробувань, повинен бути не менше розрахункового тиску руйнування.

Ємності для транспортування газу за технологією CNG зазнають періодичного заповнення та спорожнення. При цьому технологічні процеси можуть бути доволі швидкоплинними, викликати різку зміну температури газу і, відповідно, ємностей та елементів обв'язки [11, 12]. Тому під час оцінювання працездатності обладнання необхідно враховувати також можливі температурні навантаження, і зокрема застосовуючи для цього імітаційне моделювання.

На сьогодні існує загальноприйнята тенденція до дослідження динаміки механічних систем шляхом комп'ютерного моделювання [13]. Однак, на відміну від розрахунку на міцність методом кінцевих елементів, який давно увійшов в практику інженерів-дослідників [14, 15], динамічні розрахунки обладнання для транспортування газу з використанням спеціалізованого програмного забезпечення широко не застосовуються.

При моделюванні керованих динамічних систем останнім часом широко використовується спеціалізований пакет Simulink, що входить до складу автоматизованої системи Maple [16]. Програмний продукт MapleSim дозволяє істотно скорочувати терміни проектування і підвищувати якість розроблення моделей механічних систем і моделювання процесів, що відбуваються в цих системах.

З врахуванням можливостей сучасних програмних продуктів та результатів досліджень особливостей формування напружено-деформованого стану ємностей комбінованого типу і зокрема з використанням методу скінченних елементів [17] запропоновано метод оцінки працездатності балонів типу CNG-2 (рис. 2). Метод передбачає максимальне врахування умов експлуатації та фактичного стану металевого лейнера.

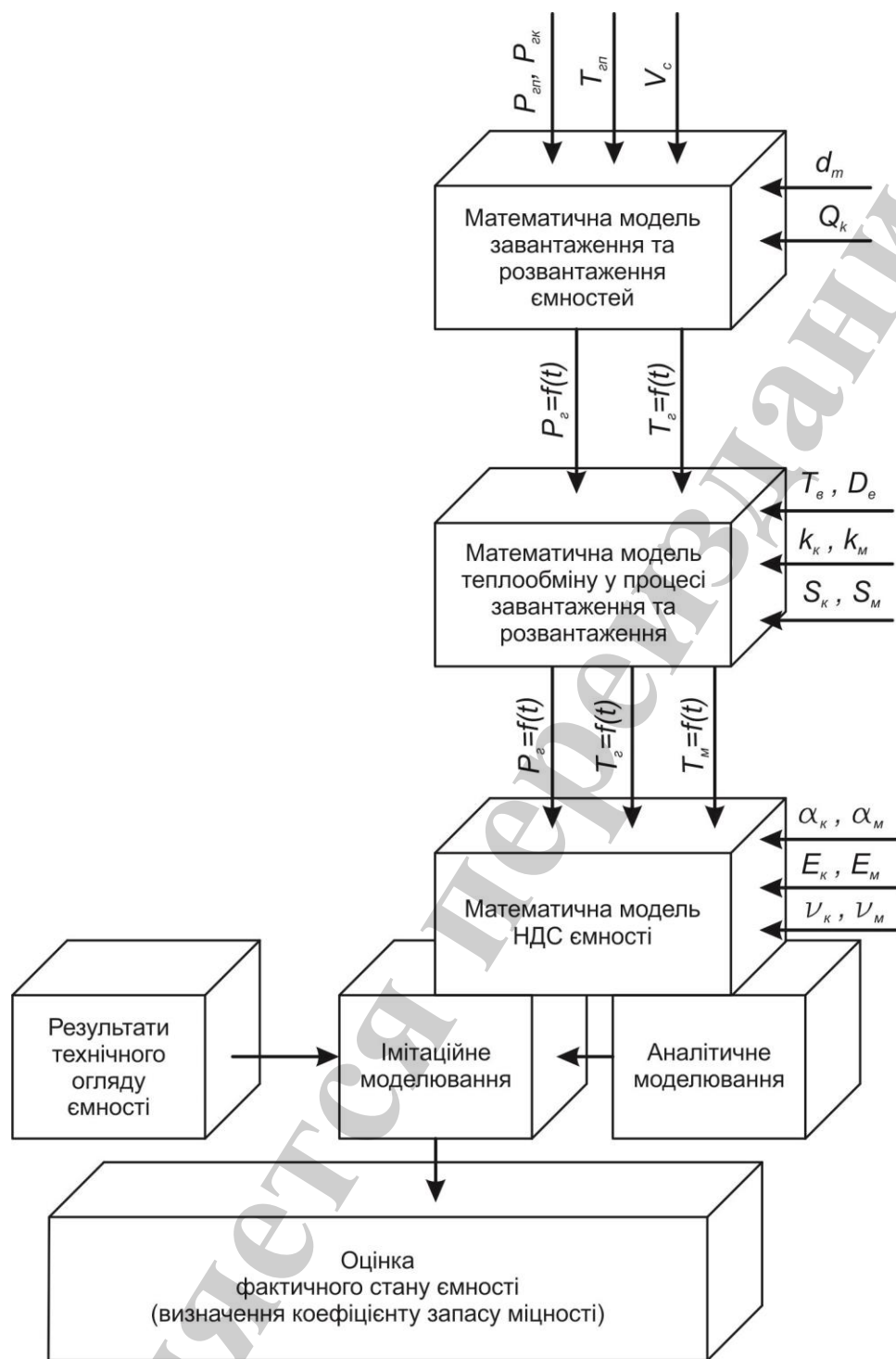


Рис. 2. Алгоритм методу оцінки працездатності ємностей комбінованого типу (балонів типу CNG-2): $P_{\text{ат}}$, $P_{\text{ск}}$ – початковий і кінцевий тиск газу в ємності; $T_{\text{ат}}$ – початкова температура газу в ємності; $V_{\text{с}}$ – об’єм ємності; d_m – діаметр з’єднувального трубопроводу; Q_k – продуктивність компресора; $D_{\text{с}}$ – діаметр ємності; $S_{\text{м}}$ – товщина металевої оболонки; $S_{\text{к}}$ – товщина композитної оболонки; $k_{\text{м}}$, $k_{\text{к}}$ – коефіцієнти теплопровідності матеріалу оболонок; $\alpha_{\text{м}}$, $\alpha_{\text{к}}$ – коефіцієнти теплового розширення матеріалу оболонок; $E_{\text{м}}$, $E_{\text{к}}$ – модулі пружності матеріалу оболонок

Метод реалізується відповідно до наведеної схеми і містить наступні етапи:

- визначення параметрів стану газу в процесі заповнення ємності;
- визначення параметрів стану газу з врахуванням процесів теплообміну;
- оцінка напружено-деформованого стану ємності з врахуванням фактичних умов експлуатації;
- технічний огляд ємності з метою виявлення можливих корозійних пошкоджень;
- оцінка напружено-деформованого стану ємності з врахуванням результатів технічного огляду;
- оцінка фактичного стану ємності.

На сьогодні проведено ряд досліджень, результати яких вже згадувались у роботі та вказують на механізми реалізації окремих етапів запропонованого методу. Однак для підтвердження достовірності результатів досліджень напружено-деформованого стану ємності за фактичних умов експлуатації шляхом імітаційного моделювання необхідною умовою є узгодження з результатами одиничного експерименту або аналітичних досліджень. Така перевірка може проводитись навіть на проміжному етапі. Зважаючи на це, більш доступними є додаткові аналітичні дослідження. З цією метою розроблено математичну модель, що враховує характер взаємодії елементів конструкції, дію внутрішнього тиску та температури газу.

5. Розроблення математичної моделі напружено-деформованого стану ємності

В основу математичної моделі покладено диференціальне рівняння радіального прогину стінки циліндра під дією внутрішнього тиску та температури, що має вигляд:

$$D \left[\frac{d^4 w(x)}{dx^4} + \frac{d^2}{dx^2} \left(\alpha \frac{\Delta T}{h} \right) \cdot (1 + \mu) \right] =$$
$$= q - \frac{Eh}{r^2} + \frac{Eh}{r} \alpha T_0, \quad (1)$$

де $D = Eh^3 / (12(1 - \mu^2))$ – циліндрична жорсткість; E – модуль пружності матеріалу циліндра; h – товщина стінки циліндра; μ – коефіцієнт Пуассона; $w(x)$ – радіальне переміщення точок серединної поверхні з радіусом r ; x – поздовжня координата; q – розподілене навантаження на внутрішній поверхні циліндра; α – коефіцієнт теплового розширення матеріалу оболонки; T_0 – температура серединної поверхні оболонки; ΔT – різниця температур між зовнішньою та внутрішньою поверхнями оболонки.

Для конструкції, що складається із металевго циліндра, на який з деяким натягом намотаний композиційний матеріал, на основі (1) запишемо систему двох диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{E_1 h_1^3}{12(1-\mu_1^2)} \left[\frac{d^4 w_1(x)}{dx^4} + \frac{d^2}{dx^2} \left(\alpha_1 \frac{\Delta T_1}{h_1} \right) \cdot (1+\mu_1) \right] = \\ = q_1 - \frac{E_1 h_1}{r_1^2} + \frac{E_1 h_1}{r_1} \alpha_1 T_{01}, \\ \frac{E_2 h_2^3}{12(1-\mu_2^2)} \left[\frac{d^4 w_2(x)}{dx^4} + \frac{d^2}{dx^2} \left(\alpha_2 \frac{\Delta T_2}{h_2} \right) \cdot (1+\mu_2) \right] = \\ = q_2 - \frac{E_2 h_2}{r_2^2} + \frac{E_2 h_2}{r_2} \alpha_2 T_{02}, \end{cases} \quad (2)$$

де E_1, E_2 – модулі пружності матеріалу металевої та композитної оболонок відповідно; μ_1, μ_2 – коефіцієнти Пуассона металевої та композитної оболонок; α_1, α_2 – коефіцієнти теплового розширення матеріалів металевої та композитної оболонок; T_{01}, T_{02} – температури серединних поверхонь металевої та композитної оболонок; $\Delta T_1, \Delta T_2$ – різниця температур між зовнішніми та внутрішніми поверхнями металевої та композитної оболонок; p_1, p_2 – тиск газу на внутрішню поверхню металевої оболонки та розподілене навантаження від механічного натягу на внутрішню поверхню композитної оболонки; h_1, h_2 – товщина металевої та композитної оболонок відповідно; r_1, r_2 – радіуси серединних поверхонь металевої та композитної оболонок відповідно; q_2 – розподілене навантаження від попереднього натягу між металевою та композитною оболонками, $q_2=p_2$; p_2 – контактний тиск в з'єднанні металевої та композитної оболонок; q_1 – розподілене навантаження на поверхні металевої оболонки, $q_1=p_1-p_2$; p_1 – тиск газу всередині металевої оболонки; $w_1(x), w_2(x)$ – функції радіальних переміщень металевої та композитної оболонок.

Вважаючи, що днище металевої оболонки приварене до циліндричної частини, його можна змодельовати на обох кінцях жорстким з'єднанням (рис. 3, а). Вважаючи, що намотана на металеву композитна оболонка має можливість елементарного переміщення в осьовому напрямі, її з'єднання з металевою оболонкою на обох кінцях моделюватимемо шарнірним з'єднанням (рис. 3, б). Тому для вказаних конструктивних особливостей з'єднань металевої та композитної частин ємності (рис. 4) функції радіальних переміщень запишемо наступним чином:

– для металевої оболонки:

$$w_1(x) = \frac{q_1 r_1^2}{E_1 h_1} \left[1 - e^{-k_1 x} (\sin(k_1 x) + c \cos(k_1 x)) \right]; \quad (3)$$

– для композитної оболонки:

$$w_2(x) = \frac{q_2 r_2^2}{E_2 h_2} \left[1 - e^{-k_2 x} c \cos(k_1 x) \right]; \quad (4)$$

де

$$k_1 = \sqrt[4]{3(1-\mu_1^2)/r_1^2 h_1^2}, \quad k_2 = \sqrt[4]{3(1-\mu_2^2)/r_2^2 h_2^2}.$$

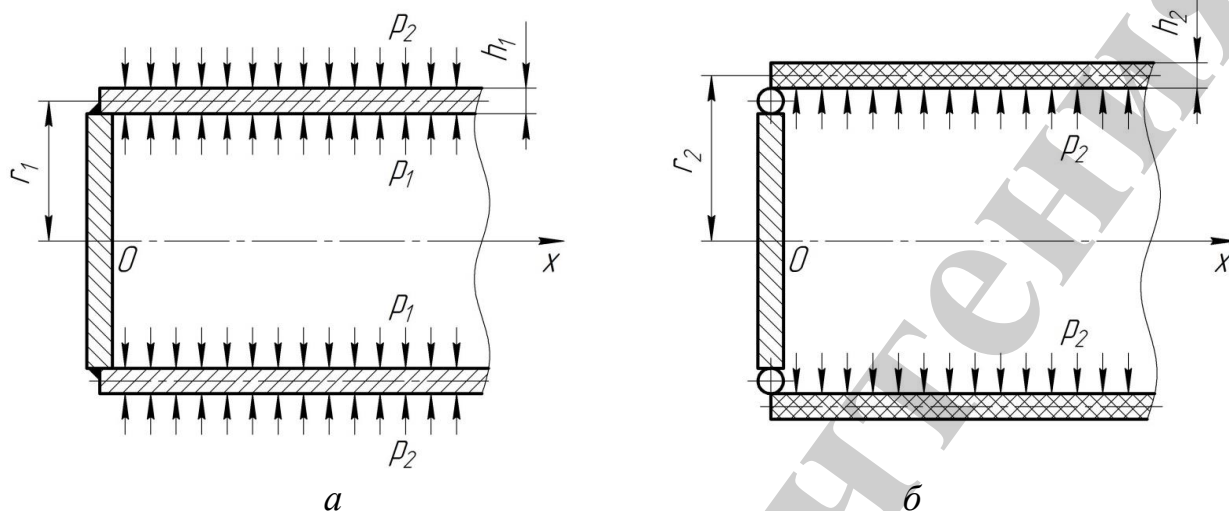


Рис. 3. Схематизація з'єднання циліндричної частини ємності комбінованого типу з її дном: *а* – металевий лейнер; *б* – композитного підсилення

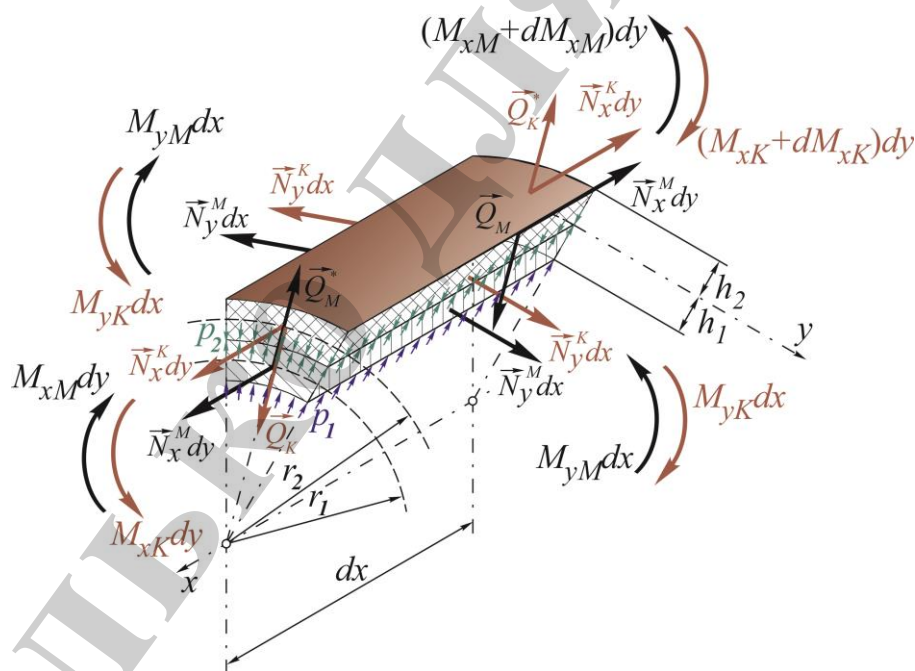


Рис. 4. Розрахункова схема циліндричної частини ємності комбінованого типу (індекси позначень: “к” – композит; “м” – метал)

Вважаючи розподіл температур по товщині стінки циліндричної оболонки лінійним, запишемо вирази для поперечної (перерізуючої) сили та згинального моменту, що діють в поперечних перерізах конструкції:

$$Q = D \left[\frac{d^3 w(x)}{dx^3} + \frac{d^2}{dx^2} \left(\alpha \frac{\Delta T}{h} \right) \cdot (1 + \mu) \right]; \quad (5)$$

$$M_x = D \left[\frac{d^2 w(x)}{dx^2} + \left(\alpha \frac{\Delta T}{h} \right) \cdot (1 + \mu) \right]. \quad (6)$$

У повздовжньому перерізі сила розтягу та згинальний момент:

$$N_x = Eh \left(\frac{w(x)}{r} - \alpha T_0 \right); \quad (7)$$

$$M_y = D \left[\mu \frac{d^2 w(x)}{dx^2} + \left(\alpha \frac{\Delta T}{h} \right) \cdot (1 + \mu) \right]. \quad (8)$$

Напруження згину та дотичне напруження в поперечному перерізі:

$$\sigma_x = -\frac{12M_x z}{h^3}; \quad (9)$$

$$\tau = \frac{Q}{h} \left(\frac{3}{2} - \frac{6z^2}{h^2} \right), \quad (10)$$

де $z = \pm \frac{h}{2}$ – відстань від точки до серединної поверхні оболонки; “+” – для зовнішнього; “-” – для внутрішнього шару оболонки.

Напруження згину та нормальні напруження розтягу в повздовжньому перерізі:

$$\sigma_y = -\frac{12M_y z}{h^3}; \quad (11)$$

$$\sigma_p = \frac{N_x}{h}. \quad (12)$$

З урахуванням залежностей (3)–(8) вирази для згинальних, дотичних та нормальних напружень (9)–(12) мають наступний вигляд:

– для металевої оболонки:

$$\sigma_{x1} = -\frac{12z_1}{h_1^3} D_1 \left[\frac{2k_1^2 q_1 r_1^2}{E_1 h_1} e^{-k_1 x} [\cos(k_1 x) - \sin(k_1 x)] + \left(\alpha_1 \frac{\Delta T_1}{h_1} \right) \cdot (1 + \mu_1) \right]; \quad (13)$$

$$\tau_1 = \frac{1}{h_1} \left(\frac{3}{2} - \frac{6z_1^2}{h_1^2} \right) D_1 \left[\frac{4k_1^3 q_1 r_1^2}{E_1 h_1} e^{-k_1 x} \left[2 \sin\left(\frac{k_1 x}{2}\right)^2 - 1 \right] + \frac{d^2}{dx^2} \left(\alpha_1 \frac{\Delta T_1}{h_1} \right) \cdot (1 + \mu_1) \right]; \quad (14)$$

$$\sigma_{y1} = -\frac{12z_1}{h_1^3} D_1 \left[\mu_1 \frac{2k_1^2 q_1 r_1^2}{E_1 h_1} e^{-k_1 x} [\cos(k_1 x) - \sin(k_1 x)] + \left(\alpha_1 \frac{\Delta T_1}{h_1} \right) \cdot (1 + \mu_1) \right]; \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{p1} &= \frac{1}{h_1} E_1 h_1 \times \\ &\times \left(\frac{q_1 r_1}{E_1 h_1} \left[1 - e^{-k_1 x} (\sin(k_1 x) + c \cos(k_1 x)) \right] - \alpha_1 T_{01} \right); \end{aligned} \quad (16)$$

– для композитної оболонки:

$$\sigma_{x2} = -\frac{12z_2}{h_2^3} D_2 \times \left[-\frac{2k_2^2 q_2 r_2^2}{E_2 h_2} e^{-k_2 x} \sin(k_2 x) + \left(\alpha_2 \frac{\Delta T_2}{h_2} \right) \cdot (1 + \mu_2) \right]; \quad (17)$$

$$\tau = \frac{1}{h_2} \left(\frac{3}{2} - \frac{6z_2^2}{h_2^2} \right) D_2 \left[\frac{2k_2^3 q_2 r_2^2}{E_2 h_2} e^{-k_2 x} [\cos(k_2 x) - \sin(k_2 x)] + \frac{d^2}{dx^2} \left(\alpha_2 \frac{\Delta T_2}{h_2} \right) \cdot (1 + \mu_2) \right]; \quad (18)$$

$$\sigma_{y2} = -\frac{12z_2}{h_2^3} D_2 \left[-\mu_2 \frac{2k_2^2 q_2 r_2^2}{E_2 h_2} e^{-k_2 x} \sin(k_2 x) + \left(\alpha_2 \frac{\Delta T_2}{h_2} \right) \cdot (1 + \mu_2) \right]; \quad (19)$$

$$\sigma_{p2} = \frac{1}{h_2} E_2 h_2 \left(\frac{q_2 r_2}{E_2 h_2} [1 - e^{-k_2 x} \cos(k_1 x)] - \alpha_2 T_{02} \right). \quad (20)$$

Сукупність отриманих аналітичних залежностей (13)–(20) є математичною моделлю для дослідження напружено-деформованого стану ємності комбінованого типу, і зокрема металевої оболонки, що не містить корозійних пошкоджень.

6. Обговорення результатів досліджень спрямованих на реалізацію методу оцінки працездатності ємностей комбінованого типу

Таким чином, за результатами досліджень запропоновано алгоритм методу оцінки працездатності ємностей комбінованого типу для транспортування стиснутого природного газу, в тому числі у складі морських транспортних засобів. При цьому перелік механізмів реалізації окремих етапів методу доповнено математичною моделлю, яка враховує умови взаємодії елементів конструкції, дію внутрішнього тиску газу та температури. Використання моделі скорочує затрати на проміжні експериментальні дослідження та сприяє забезпеченню достовірності результатів імітаційного моделювання. Це підтверджено результатами, що отримані з використанням розробленої моделі та наведені на рис. 5, 6. Вони відображені графіками зміни колових напружень в елементах балона комбінованого типу з внутрішнім діаметром 0,205 м за товщини стінки металевої оболонки 3,15 мм а композитної – 2,8 мм [17]. На рис. 5 наведено графік зміни колових напружень в металевій та композитній оболонці за умов відсутності внутрішнього тиску. При цьому кільцеві напруження в металевому лайнері зумовлені попереднім натягом, що створюється при формуванні композитної оболонки.

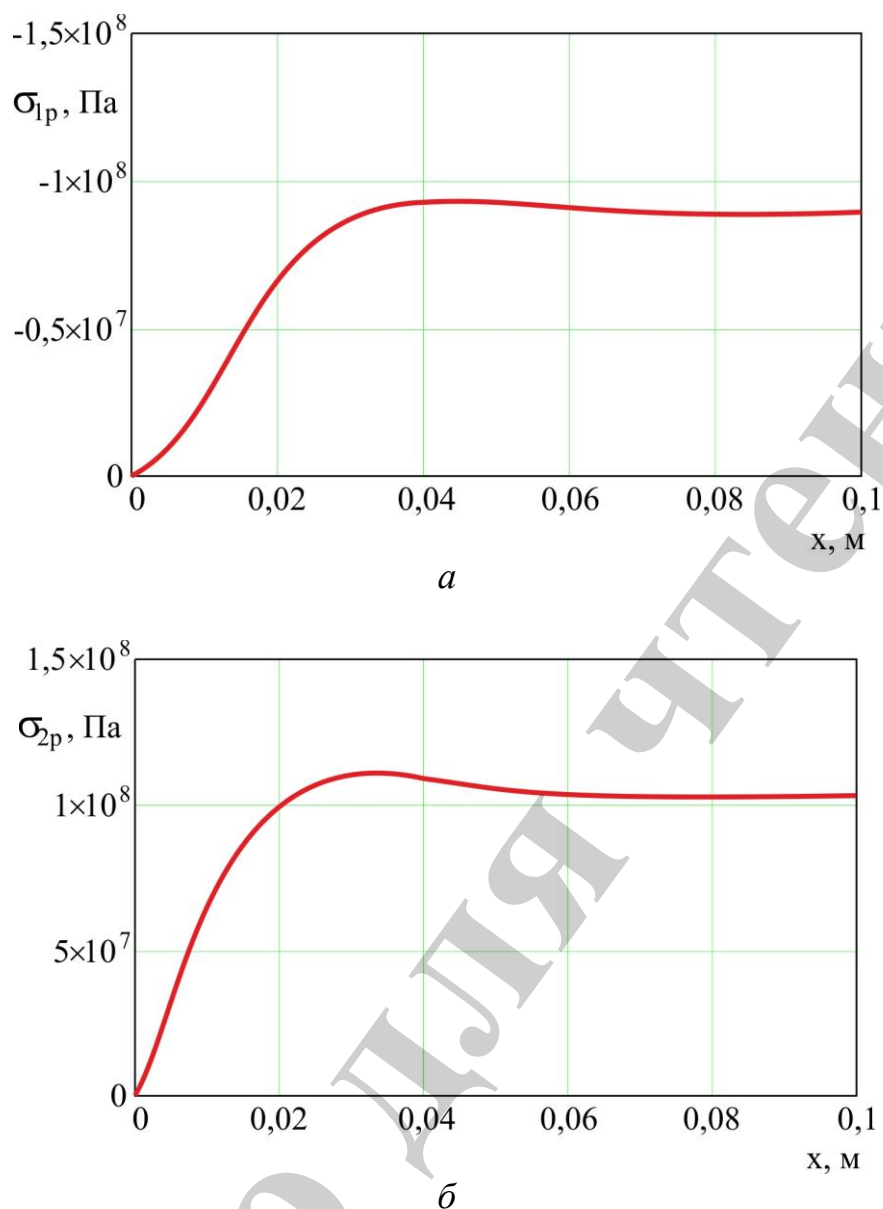


Рис. 5. Графіки зміни колових напружень за умов відсутності внутрішнього тиску: *a* – в металевій оболонці (σ_{1p}); *б* – в композитній оболонці (σ_{2p})

На рис. 6 наведено графік зміни колових напружень в металевій оболонці при тиску газу в балоні рівному 20 МПа. Отримані результати корелюються із наведеними в [17] і підтверджують можливість використання запропонованої математичної моделі.

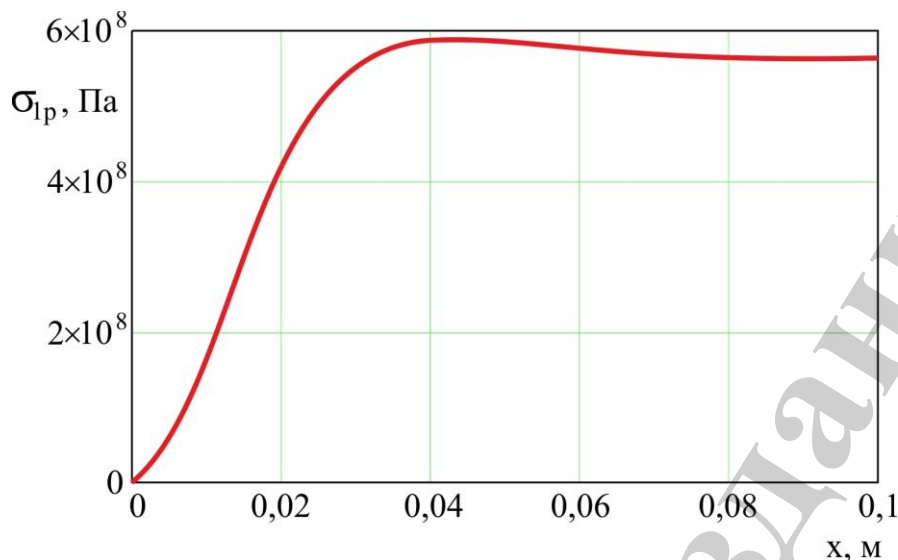


Рис. 6. Графік зміни колових напружень в металевій σ_{1p} оболонці при тиску газу в балоні 20 МПа

Можливість отримання достовірних результатів на початкових етапах реалізації методу за наявності доступних механізмів підтверджено власними дослідженнями особливостей протікання технологічних процесів завантаження та розвантаження ємностей для транспортування стиснутого природного газу.

Слід зазначити також, що врахування у перевірній імітаційній моделі результатів технічного огляду, і зокрема ймовірних корозійних пошкоджень, забезпечує можливість оцінки фактичного технічного стану ємностей комбінованого типу.

Практичне значення одержаних результатів визначається можливістю використання як на етапі проектування, так і в процесі експлуатації ємностей.

Щодо обмежень пропонованих до використання засобів для оцінки стану поверхні металевих лейнерів комбінованих посудин високого тиску необхідно зазначити, що вони забезпечують можливість отримання інформації тільки про стан поверхні металевих лейнерів. Фактичні значення товщини стінки визначаються різницею початкового значення і виявленої за результатами досліджень втрати металу.

Стосовно недоліків розробленої математичної моделі слід виділити наступне:

- 1) неврахування у функціях радіальних переміщень $w_1(x)$, $w_2(x)$ ще однієї змінної – радіусів серединних поверхонь металевих та композитних оболонок, які в процесі експлуатації ємностей змінюються;

- 2) розподілене навантаження від попереднього натягу q_2 і, відповідно, контактний тиск p_2 в з'єднанні металевих та композитних оболонок вважається постійним, хоча при збільшенні тиску в металевій ємності і відповідно радіусу її серединної поверхні цей тиск також збільшується.

Введення радіусів серединних поверхонь як ще однієї змінної у функціях w_1 , w_2 вимагатиме в системі рівнянь (2) застосування часткових похідних, що в

подальшому призведе до неминучого ускладнення формул для практичного розрахунку напружень (13)–(20). Зміна тиску p_2 і відповідно натягу q_2 в радіальному та в осьовому напрямках є багатофакторним процесом, що залежить від особливостей намотування композиту на металевий лейнер, дослідження якої на даний час вимагає значної кількості експериментів.

До недоліків запропонованого методу в цілому слід віднести необхідність створення для його реалізації цілісного програмного комплексу з численними взаємозв'язками між окремими підпрограмами.

Подальші дослідження необхідно спрямувати на експериментальну перевірку результатів реалізації методу в цілому. Підтвердження його високої достовірності слугуватиме основою при впровадженні методу організаціями, що здійснюють контроль технічного стану ємностей для транспортування стиснутого природного газу.

7. Висновки

1. З метою безпечного транспортування стиснутого природного газу за результатами проведених досліджень запропоновано алгоритм методу оцінки працездатності ємностей комбінованого типу. Метод передбачає використання засобів для виявлення та визначення форми і розмірів ймовірних корозійних пошкоджень поверхні металевого лейнера під композитною оболонкою. Дослідження напружено-деформованого стану ємностей з врахуванням умов експлуатації, зумовлених особливостями протікання технологічних процесів, здійснюється шляхом розроблення та аналізу моделей у відповідних сучасних програмних продуктах. Завдяки цьому перевагою методу є визначення розрахункового тиску руйнування ємностей комбінованого типу за наявного стану небезпечних зон та впливу умов експлуатації.

2. Для перевірки правильності побудови імітаційної моделі на етапі дослідження напружено-деформованого стану ємності з врахуванням фактичних умов експлуатації, розроблено математичну модель, яка враховує умови взаємодії елементів конструкції, дію внутрішнього тиску газу та температури. Її використання сприяє забезпеченню достовірності результатів імітаційного моделювання, виключаючи необхідність проведення експериментальних досліджень.

Література

1. About // KGTM Kelley GasTransportModules. URL: <http://kelleygtm.com/about/>
2. Stephen G., Cano G. CNG Marine Transport-Demonstration Project Development // Offshore Technology Conference. 2006. doi: <https://doi.org/10.4043/17780-ms>
3. Titan® Specifications. URL: <http://www.hexagonlincoln.com/mobile-pipeline/titan/titan-specifications#>
4. Спосіб транспортування стиснутого природного газу рухомим трубопроводом: Пат. UA № 67664. МПК: F17C 5/00 / Зайцев В. В., Патон Б. Є., Мандрик О. М., Крижанівський Є. І., Швидкий Е. А., Савицький М. М. №

u201114580; заявл. 08.12.2011; опубл. 27.02.2012, Бюл. № 4. URL: <http://uapatents.com/2-67664-sposib-transportuvannya-stisnutogo-prirodnogo-gazu-rukhomim-truboprovodom.html>

5. ISO 11439-2003. Gas cylinders – High pressure cylinders for the on-board storage of natural gas as a fuel for automotive vehicles // International Standard. ISO. 2003.

6. Мандрик О. М., Савицький О. М., Артим В. І. Аналіз методів зміцнення замкнутих ємностей для безпечного транспортування природного газу // Наукові нотатки. 2013. Вип. 41. С. 176–186.

7. Damage evaluation for Type-II CNG cylinder by the analysis of AE parameters / Hyun-Sup J. E. E., Jong-O L. E. E., No-Hoe J. U., Cheal-Ho S. O., Jong-Kyu L. E. E. // 30th European Conference on Acoustic Emission Testing & 7th International Conference on Acoustic Emission. University of Granada, 2012. URL: https://www.ndt.net/article/ewgae2012/content/papers/37_Jee.pdf

8. Криничний П. Я., Карпаш О. М., Райтер П. М. Комп'ютеризовані технічні засоби контролю корозійного пошкодження трубопроводу // Обеспечение эксплуатационной надежности систем трубопроводного транспорта: Научно-практический семинар. Киев, 2005. С. 173–175.

9. Визначення корозійних втрат металу труб з використанням високочастотного індуктивного давача / Слободян В. І., Райтер П. М., Джус А. П., Івасів О. В. // Наукові нотатки. 2013. № 42. С. 273–281.

10. Івасів В. М., Джус А. П., Івасів О. В. Визначення технічного стану ємностей комбінованого типу в процесі їх експлуатації // Вісник Національного технічного університету “ХПІ”. Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. 2015. № 22. С. 103–108.

11. Джус А. П., Сусак О. М. Дослідження умов експлуатації ємностей, виконаних у вигляді довгомірних труб // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. Т. 5, № 7 (71). С. 25–30. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.27995>

12. Джус А. П., Сусак О. М., Зайцев Вал. В. Дослідження процесів розвантаження суден для транспортування стиснутого природного газу (CNG) // Збірник наукових праць НУК. 2015. № 3. С. 26–32. doi: <https://doi.org/10.15589/jnn20150304>

13. Поршнев С. В. Компьютерное моделирование физических процессов в пакете MATLAB. М.: Горячая линия – Телеком, 2003. 592 с.

14. Бесчетников Д. А., Львов Г. И. Контактная задача для цилиндрической оболочки с бандажом из композитного материала // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Динаміка та міцність машин. 2012. № 67 (973). С. 19–25.

15. Егоров Д. В., Баляков Д. Ф., Широкова Н. Н. Особенности конечно-элементного моделирования изделий из композитных материалов в космической технике // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2014. № 10. С. 27–28.

16. Betounes D., Redfern M. Mathematical Computing: An Introduction in Programming Using Maple. Hattiesburg: Springer-Verlag, 2002. 420 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0067-0>

17. Джус А. П. Дослідження напружено-деформованого стану елементів комбінованих посудин високого тиску // Молодий вчений. 2015. № 11. С. 24–28.